

KATA PENGANTAR

Beton Fiber sudah cukup populer digunakan pada struktur bangunan, baik pada bangunan infra struktur seperti pada bantalan Rel Kereta Api, pada struktur rangka gedung.

Salah satu keuntungan dan kemudahan pelaksanaan pekerjaan Struktur Rangka gedung dengan material beton fiber adalah dengan kandungan fiber dalam campuran beton dapat mengeliminir pemakaian baja tulangan samapai pada batas tertentu. Dengan supplement fiber ini dari segi ekonomi beton akan menjadi lebih murah, dan dari segi struktur memberi kemudahan mengerjakan terutama pda pertemuan (joint) balok dengan kolom, dimana momen tumpuan balok lebih besar dari momen lapangan karena ada akumulasi momen akibat kombinasi beban grafitasi dan beban gempa/angin, apabila campuran beton tidak diberi tambahan fiber akan terjadi penumpukan tulangan yang akan menyulitkan pelaksanaan pengecoran (concreting) sehingga dapat menimbulkan krops pada lokasi tulangan yang menumpuk. Dengan memberi tambahan fiber ini diharapkn dapat mengurangi kesulitan-kusulitan tersebut.

Beton fiber ini merupakan bagian dari mata kuliah Struktur Beton I, yang disampaikan secara terstruktur pada semester IV, sebagai variant pengetahuan struktur beton yang disisipkan pada caturwulan ketiga pada semester IV ini. Semoga buku ajar ini dapat memberikan wawasan yang lebih luas bagi mahasiswa jurusan Teknik Sipil dalam mata kuliah Struktur Beton.

Surabaya, 1 September 2017

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI.....	ii
DAFTAR TABEL	3
DAFTAR GAMBAR.....	4
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Umum	6
1.2. Bahan fiber Polimer	7
BAB II MATERIAL BETON	
2.1. Bahan Beton.....	15
2.2. Beton Mutu tinggi (<i>High Strength Concrete/HSC</i>)	18
2.3. Beton Mutu Tinggi	20
BAB III BETON FIBER KOMPOSIT	
3.1. Beton fiber komposit tanpa baja tulangan	25
3.2. Kombinasi dengan tulangan dan pratekan	25
3.3. Dipakai pada perbaikan dan rehabilitasi	25
3.4. Perilaku mekanik beton fiber	26
BAB IV REPAIR BETON DENGAN FIBER	
4.1. Analisa Struktur Plat Lantai Existing	34
4.2. Analisa Statika dengan Soft-ware	34
4.3. Analisa kebutuhan CFRP plate dan Material Patching Mortar	39
4.4. Metode Uji Tarik CFRP	40
DAFTAR PUSTAKA.....	44

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel: I.1. Sifat – sifat fisik serat polimerik.	8
Tabel II.1. Volume agregat kasar kondisi kering padat	19
Tabel II.2. Perkiraan jumlah air dan udara terperangkap dengan kadar air	19
Tabel II.3. Rasio air semen, untuk beton tanpa HRWR	20
Tabel : IV.1. Dimensi dan jumlah Spesimen CFRP.	40
Tabel : 4.2. Hasil uji Tarik Spesimen CFRP.	42

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar: 1.1. Penampang komposit dengan pulau-pulau serat tersebar merata dan random	9
Gambar: 1.2. Retak yang akan berkembang dihambat oleh serat, dengan menjembatani bagian yang terpisah	13
Gambar: 1.3. Matrix terpecah-pecah akibat retak, menjadi beberapa block dengan panjang (a). Komposit bergerak menjauhi retak dengan jarak sama dan serat menahan block kearah yang berlawanan (b)	13
Gambar: 2.1. Hubungan antara tegangan tekan f_c' dan tegangan Tarik f_t	21
Gambar: 3.1. Penampang beton fiber komposit tanpa tulangan	25
Gambar: 3.2. Penampang kombinasi dengan tilangan dan pratekan	25
Gambar: 3.3. Penampang fiber komposit pada perbaikan dan Rehabilitasi	25
Gambar: 3.4. Perilaku tegangan-regangan dari beton fiber akibat Gaya	27
Gambar: 3.5. Perilaku tegangan-regangan dari beton fiber akibat gaya tekan pada beton mutu tinggi (Sumber: Balguru & Shah, 1992)	27
Gambar: 3.6. Curva tegangan-regangan serat dengan matrix daktil (Sumber: Balguru & Shah, 1992)	29
Gambar: 3.7. Curva tegangan-regangan serat dengan matrix getas (Sumber: Balguru & Shah, 1992)	29
Gambar: 3.8. Curva tegangan-regangan beton fiber dengan matrix getas (Sumber: Balguru & Shah, 1992)	30
Gambar: 3.9. Tipikal Curva Beban-Defleksi beton fiber akibat Lentur (Sumber: Balguru & Shah, 1992)	32
Gambar: 4.1. Skema Plat terjepit elastis 4 sisi	35
Gambar: 4.2. Shell Element Stress and Internal Forces	38
Gambar: 4.3. Discrete Plat Lantai	38
Gambar: 4.4. Deformasi lentur arah bentang L_y dan L_x	39

Gambar: 4.5. Diagram block Tegangan Plat Beton	39
Gambar :4.6.Detail I, Aplikasi CFRP	40
Gambar :4.7 Plat CFRP ukuran 1,20 X 50,00 X 1000 mm	41
Gambar :4.8. Proses pemotongan CFRP	41
Gambar :4.9. Spesimen CFRP yang sudah terbentuk (7 buah)	41
Gambar: 4.10. Proses uji tarik Spesimen CFRP	42
Gambar : 4.11. Arsip Spesimen CFRP yang sudah putus	42
Gambar : 4.12. Grafik Kuat Tarik Spesimen 1	43
Gambar : 4.13. Grafik Kuat Tarik Spesimen 2	43
Gambar : 4.14. Grafik Kuat Tarik Spesimen 3	43
Gambar: 4.15. Grafik Kuat Tarik Spesimen 4	43
Gambar: 4.16. Grafik Kuat Tarik Spesimen 5	43
Gambar: 4.17. Grafik Kuat Tarik Spesimen Gabungan 1 s/d 5	43

I. PENDAHULUAN

1.1. Umum

Pemakaian bahan beton untuk sistem-sistem konstruksi sudah banyak dan umum kita jumpai. Beton sederhana dibentuk oleh pengerasan campuran semen, air, agregat halus, agregat kasar, udara, dan dapat pula diberi campuran tambahan lainnya. Campuran yang masih plastis ini dicor kedalam acuan dan dirawat untuk mem-percepat reaksi hidrasi campuran semen air, yang menyebabkan pengerasan beton secara lebih sempurna. Bahan yang terbentuk ini mempunyai kekuatan tekan yang tinggi, mudah dibentuk melalui cetakan menurut keinginan. Kemudian dengan cara menempatkan campuran yang masih basah kedalam cetakan, sampai terjadi proses pengerasan beton. Dibalik kelebihan-kelebihan (terutama kekuatan tekan) yang dimiliki, beton juga memiliki beberapa kelemahan antara lain mempunyai kekuatan tarik dan lentur yang sangat rendah, mempunyai sifat brittle (getas) terutama pada beton mutu tinggi, sehingga perlu diadakan upaya-upaya untuk memperbaiki sifat fisik beton yang dapat meningkatkan kemampuannya secara mekanik.

Penggunaan serat (fiber) dalam campuran beton adalah salah satu solusinya, dimana penambahan fiber dalam campuran beton yang disebar secara merata, dapat mengurangi terjadinya retakan didaerah tarik akibat pengaruh pembebanan

Secara umum ;”*Fiber reinforced concrete*” adalah beton yang dibuat dari campuran semen, agregat halus, agregat kasar, air, dan sejumlah fiber yang disebar secara random adukan.

Penelitian tentang pemakaian fiber (serat) dalam campuran beton telah banyak dilakukan, sehingga dipandang perlu untuk merujuk beberapa literature pendukung yang membahas tentang beton fiber, sebagai petunjuk langkah-langkah dalam penelitian tentang plastic beneser sebagai salah satu alternatif bahan fiber komposit pada campuran beton.

1.2. Bahan fiber Polimer

1.2.1. Type Fiber Polimer

- a. Acrylic** : mempunyai serat yang paling sedikit 85% dari beratnya acrylonitrile, modulus elastisitasnya lebih besar dari serat polimerik yang lain
- b. Aramid** : mempunyai modulus elastisitas jauh lebih besar dibanding yang lain, dapat menaikkan perilaku mekanik beton berserat yaitu kuat tarik dan kuat lenturnya.
- c. Nylon** : serat ini tersedia dalam berbagai variasi ukuran panjang, sangat tipis, jumlah serat dalam setiap pound (0,45kg) sekitar 35 juta serat, dengan kira-kira 19mm.
- d. Polyester** : terbuat dari ethil acetate monomers, sifat fisik dan kimianya dapat berubah dengan beberapa modifikasi dalam pabrik, sehingga dicapai modulus elastisitas yang tinggi dan interaksi dengan matrik yang cukup baik.
- e. Polyethylene** : ukuran standart panjang serat antara 12-50 mm, dan dalam bentuk bubuk. Serat terpanjang yang ada dipasaran mempunyai permukaan berbntil-bintil yang membuat serat ini mempunyai ikatan yang baik dengan matrik.

Serat ini dapat menaikkan daktilitas, kuat impact, dan menaikkan faktor kelelahan(ketahanan siklik).

- f. Polypropylene :** material ini berbentuk untaian filament-filamen dengan panjang antara 6-50 mm, ketika dicampurkan dalam adukan beton, untaian itu terurai. Serat jenis ini dapat meningkatkan kuat tarik lentur dan tekan beton, mengurangi retak-retak akibat penyusutan, meningkatkan data tahan terhadap impact, dan meningkatkan daktilitas.

Serat sintesis polimerik diproduksi sebagai hasil pengembangan di Industri Petrokimia dan tekstil. Type serat yang telah dicoba penggunaanya dalam beton fiber adalah acrylic, aramid, nylon, polyster, dan polypropelene. Semua serat ini mempunyai kuat tarik yang sangat tingg, kecuali aramid yang mempunyai modulus elastisitas yang relatif rendah dibandingkan dengan jenis serat polimerik lainnya.

Sifat –sifat fisik dari serat jenis polimerik secara rinci adalah:

Tabel: I.1. Sifat – sifat fisik serat polimerik.

Fiber tipe	Eff. Dia. x 10^{-3} in (x. 10^{-3} mm)	Specific Gravity	Tensile Strength Ksi (Mpa)	Elastic Modulus Ksi (Mpa)	Ultimate Elong (%)
Acrylic	0,5–4,1 (13–104)	1,17	30 - `45 (201–1000)	2000–2800 (14,6–19,6)	7,5–50,0
Aramid I	0,47	1,44	525	9000	4,4
Aramid II (Hingth Modulus)	0,40 (10)	1,44	140 (965)	17000 (117)	2,5
Nylon		1,16	130–160 (896–1100)	750 (517)	20,0
Polyster		1,34–1,39	29 – 35 (200–300)	2500 (17,5)	
Polyethylene	1,0–4,0 (25–1020)	0,96	29 – 35 (200–300)	725 (5,0)	3,0
Polypropy - Lene		0,90–0,91	45 – 110 (310–760)	500–700 (3,5–4,9)	15,0

Sumber : Balguru & Shah, 1992

1.2.2. Aspek rasio kelangsingan

Yang dimaksud rasio kelangsingan adalah perbandingan antara panjang fiber (panjang potongan) dengan diameter fiber. Sehubungan dengan rasio kelangsingan ini, ada dua penggolongan :

- a. **Long Aligned Fiber (LAF)** : yaitu serat panjang dan menerus.
- b. **Discontinuous Aligned Fiber (DAF)** : yaitu serat terpotong – potong.

Kelakuan komposit model DAF lebih kecil dibandingkan memakai LAF, karena model DAF penyebaran pusat serat melemahkan ikatan lekatan.

1.2.3. Fiber volume fraction

Fiber volume fraction adalah prosentase/konsentrasi bagian serat dalam satuan volume beton.

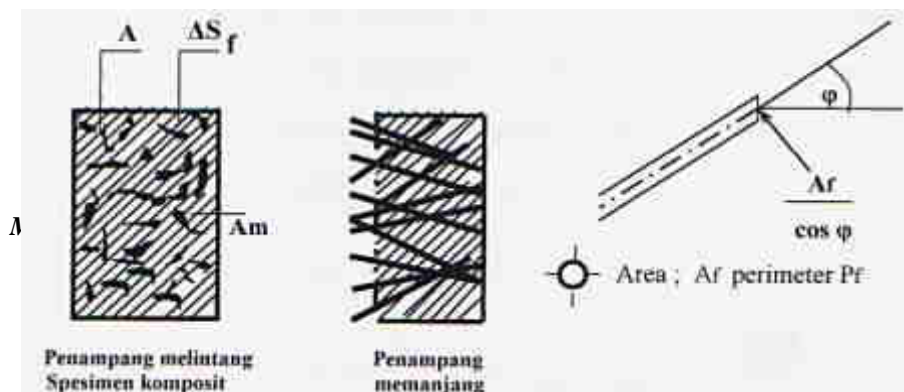
$$V_f = \frac{\Sigma \Delta S_f}{A} ; \Delta S_f = \frac{A_f}{\cos \phi} \dots\dots\dots (1)$$

dimana : $\Sigma \Delta S_f$ = jumlah luasan serat, sebanding penampang melintang potongan specimen.

A_f = luas penampang serat, tegak lurus sumbu memanjang serat.

A = luas penampang potongan melintang specimen.

Φ = sudut antara sumbu serat dengan garis sumbu specimen.



Gambar: 1.1. Penampang komposit dengan pulau-pulau serat tersebar merata dan random

Makin besar volume fraction dari serat yang ditambahkan pada campuran beton, semakin meningkatkan kekuatan beton serat yang dihasilkan. Tetapi pro-sentase peningkatan mutu akan berkurang bila V_f max dari serat tersebut.

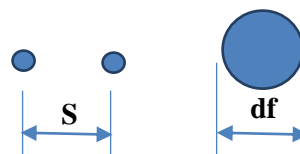
a. Jarak / spasi serat (fiber spacing) :

Spasi fiber dalam suatu komposit mempengaruhi kelakuan komposit tersebut, selama pengadukan dan penuangannya. Sifat – sifat adukan akan tergantung pada kerapatan jarak serat. Energi yang dibutuhkan untuk menempatkan dan mendistribusi material matrik jika spasi serat sempit / kecil, akan lebih besar jika disbanding spasi lebar. Sulit sekali memastikan / mengontrol besar spasi serat dalam adukan beton, apalagi jika dipakai serat terpotong – potong, maka penyebaran serat secara random pada volume beton. Namun sebagai pendekatan dengan teori (pra-kiraan) awal percobaan, dapat digunakan perumusan Romualdi and Mandel sebagai berikut :

$$\text{Spasi rata – rata : } S = \frac{13,8 \cdot d_f}{\sqrt{100V_f}} \dots\dots\dots (2)$$

dimana : V_f = fiber volume fraction

d_f = diameter fiber



atau dengan rumus Mc Kee. D. C. : $S = \left(A_f \frac{I_f}{V_f} \right)^{\frac{1}{3}} \dots (3)$

dimana : A_f = luas potongan melintang serat = $\frac{1}{4} \pi \cdot d_f^2$

I_f = panjang serat

b. Jumlah serat per-satuan luas penampang komposit (Ni) :

Pada suatu penampang melintang beton serat, dengan luas penampang specimen komposit terdiri dari bagian luasan matrik beton dan serat ($A_m + A_f$). Bila suatu benda uji mempunyai dimensi ukuran tertentu, pada suatu kadar serat V_f dapat ditentukan perkiraan jumlah serat yang terkandung didalamnya. Sesuai yang dirumuskan oleh Sorousian and Bayazi :

$$N_i = \alpha \frac{V_f}{A_f} \dots \dots \dots (4)$$

(4)

dimana : untuk serat berorientasi random 3 arah.

bila $w, h \leq I_f$

$$\alpha = 6 \cdot \frac{I_f^2}{w \cdot h} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{w}{\sqrt{6 \cdot I_f}} \right) \cdot \tan^{-1} \left(\frac{h}{\sqrt{6 \cdot I_f}} \right) \dots (5)$$

bila $w, h > I_f$

$$\alpha = 0,098 \cdot \frac{I_f^2}{w \cdot h} + 0,2 \cdot I_f \frac{(w+h)}{w \cdot h} + 0,405 \dots (6)$$

dimana : w, h = ukuran lebar dan tinggi penampang atau diameter penampang lingkaran

c. Specific fibre surface (SFS) :

Specific fibre surface (SFS) adalah total luas permukaan serat didalam satuan volume komposit. Hal ini berpengaruh dalam pencampuran dan penuangan beton, karena memperbesar luasan agregat beton. Segregesi terjadi bila permukaan agregat sangat besar. Selain pengaruh jelek

tersebut, ada juga pengaruh menguntungkan dari SFS ini, yaitu mempengaruhi lebar retak pada beton. Semakin besar total luas permukaan serat pada penampang beton, semakin besar hubungan lekatan serat dengan pasta semen dan agregat, sehingga semakin besar pula lekatan (gaya geser) permukaan serat. Besarnya geseran ini memperbesar ikatan pada bagian – bagian material, sehingga memperkecil terbentuknya retak. Untuk menghitung nilai SFS suatu campuran beton serat, dipakai perumusan Herbert Krenchel seperti berikut :

$$SFS = O_f \cdot N \dots\dots\dots (7)$$

dimana : $O_f = P_f \cdot l_f$. luas permukaan serat

N = jumlah serat

P_f = keliling penampang serat

Sehingga :

$$SFS = \frac{p_f}{A_f} \cdot V_f \dots\dots\dots (8)$$

1.2.4. Mekanisme kerja kekuatan serat beton

Kegagalan komposit fiber terjadi dari dua hal :

- a. Apabila fiber tercabut dari matrik beton.
- b. Terjadi retak matrik yang tak beraturan.

Bila suatu komposit menderita suatu pembebanan ada sebagian tegangan yang disalurkan matrik ke fiber. Besar tegangan yang disalurkan adalah :

$$\frac{d\sigma}{dz} = \frac{2\tau}{r} \dots\dots\dots (9)$$

dimana : $d\sigma$ = penyaluran / distribusi tegangan sejak dz

r = jari – jari fiber

τ = tegangan geser maksimum

saat sebuah fiber tercabut dari setengah bagian matrik, besarnya tegangan tarik serat σ_f pada permukaan retak :

$$\sigma_f = \frac{2 \cdot \tau \cdot y}{r} \dots \dots \dots (10)$$

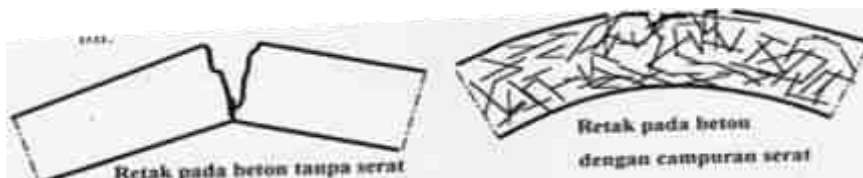
dimana:

y = panjang fiber yang tercabut dari matrik.

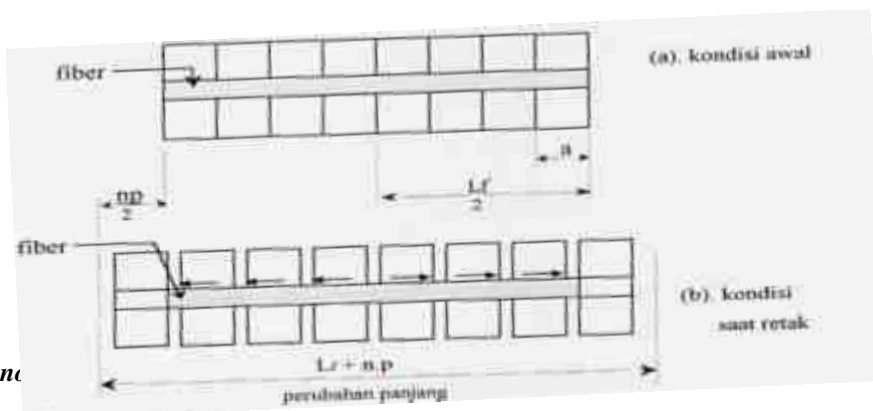
Bila $y = \frac{1}{2} l_c$, dimana l_c adalah panjang kritis serat, mampu tertarik sampai putus maka tegangan dalam serat = σ_{fu} (tegangan yang menyebabkan fiber putus) dan besarnya tegangan yang terjadi dalam serat menjadi :

$$\sigma_{fu} = \frac{\tau \cdot l_c}{r} \dots \dots \dots (11)$$

Tidak akan ada fiber yang putus jika panjang fiber kurang dari l_c atau fiber dengan panjang potongan kurang dari l_c , akan tercabut sebelum total kekuatannya terlampaui. Dengan penambahan serat pada matrik beton, apabila terjadi retak pecah – pecah (akibat retak) sehingga $I = n \cdot a$ (n jumlah balok), seperti gambar I.2 dan I.3 dibawah ini.



Gambar: 1.2. Retak yang akan berkembang dihambat oleh serat, dengan menjembatani bagian yang terpisah



Mon

Gambar: 1.3. Matrix terpecah-pecah akibat retak, menjadi beberapa block dengan panjang (a). Komposit bergerak menjauhi retak dengan jarak sama dan serat menahan block ke arah yang berlawanan (b)

Pada bagian yang retak, terdapat tahanan dari fiber dengan geseran pada serat berlawanan dengan arah gaya retak pada blok – blok matrik, dimana besar gaya geser pada blok – blok tersebut adalah sama besar. Pada saat lebar tiap pecahan/retak = p , maka panjang elemen komposit = $l_f + n \cdot p$. Dan bagian fiber yang masih menjembatani retak dalam komposit adalah : $\left(1 - \frac{n \cdot p}{l_f + n \cdot p} \right)$ sedangkan tegangan yang terjadi pada komposit adalah :

$$\sigma_p = 1/2 \sigma_{fu} \cdot V_f \frac{l_f}{l_c} \left(1 - \frac{n \cdot p}{l_f + n \cdot p} \right)^2 \dots\dots\dots (12)$$

Dari persamaan ini diketahui pengaruh retak tidak menurunkan secara drastis tegangan komposit, tetapi pelan – pelan (persamaan kuadrat).

II. MATERIAL BETON

2.1. Bahan beton

2.1.1. Semen Portland

Semen Portland dibuat dari serbuk halus mineral kristalin yang komposisi utamanya adalah kalsium dan aluminium silikat. Penambahan air pada mineral ini menghasilkan suatu pasta yang jika mengering akan mempunyai kekuatan seperti batu. Berat jenisnya berkisar antara 3,12 dan 3,16. Adapun bahan baku pembentuk semen adalah :

- 1) (CaO) adalah limestone yang mengandung kalsium oksida.
- 2) (SiO₂) adalah lempung yang mengandung silica dioksida.
- 3) (Al₂O₃) adalah lempung yang mengandung aluminium oksida.

Semen Portland yang digunakan harus memenuhi syarat SII 0013-81 dan Peraturan Umum Bahan Bangunan Indonesia (PUBI) 1982. Untuk semen Portland pozzolan harus memenuhi syarat SII 0132-75, dan persyaratan – persyaratan yang ditentukan dalam pedoman beton 1989 pasal 3.2.

2.1.2. Air

Air yang digunakan untuk membuat beton harus bersih, tawar dan dapat diminum. Tidak boleh mengandung minyak, asam, alkali, garam – garam, zat organik atau bahan – bahan lain yang bersifat merusak beton dan baja tulangan. Nilai banding berat air dan semen untuk suatu adukan beton dinamakan “water cement ratio (W.C.R)”.

Agar terjadi proses hidrasi yang sempurna dalam adukan beton, pada umumnya dipakai nilai w.c.r antara 0,40 – 0,60 tergantung mutu beton yang hendak dicapai. Semakin tinggi mutu beton yang ingin dicapai umumnya menggunakan nilai w.c.r semakin rendah. Persyaratan air untuk campuran beton yang lebih lengkap mengacu pada pedoman beton 1989 pasal 3.4.

2.1.3. Agregat

Agregat terbagi atas agregat halus dan kasar. Agregat halus umumnya terdiri dari pasir atau partikel-partikel yang lewat # 4 atau 5 mm, sedangkan agregat kasar tidak lewat saringan tersebut. Agregat yang digunakan harus memenuhi ketentuan SII 0052-80 dan dalam hal-hal yang tidak tercakup dalam standard tersebut juga harus memenuhi ketentuan ASTM C-33, specification for concrete aggregates. Persyaratan-persyaratan tentang bahan agregat ini juga harus memenuhi ketentuan dalam Pedoman Beton 1989 pasal 3.3. Umumnya penggunaan bahan agregat dalam adukan beton mencapai jumlah $\pm 70\%$ - 75% dari seluruh massa padat beton. Untuk mencapai kekuatan beton sesuai persyaratan, perlu diperhatikan kepadatan dan kekerasan massanya.

Karena semakin padat dan keras massa agregat akan makin tinggi kekuatan dan durabilitynya.

Untuk membentuk massa padat diperlukan susunan gradasi butiran agregat yang baik. Disamping bahan agregat harus mempunyai cukup kekerasan, sifat kekal, tidak bersifat reaktif terhadap alkali, dan tidak mengandung bagian-bagian kecil (< 70 micron) atau lumpur. Prinsipnya nilai kuat beton yang dicapai sangat ditentukan oleh mutu bahan agregat tersebut.

2.1.4. Bahan campuran tambahan

Ada beberapa jenis dan fungsi dari bahan campuran tambahan yang diberikan kedalam campuran beton yang umumnya berupa bahan kimia. Pemilihan bahan ini disesuaikan dengan kebutuhan dan fungsi dari beton yang direncanakan (dikerjakan).

Untuk mengerjakan beton yang direncanakan dengan mutu tinggi (High Strength Concrete), faktor kesulitan pengerajaannya juga semakin tinggi, karena faktor air semennya harus rendah ($0,25 - 0,27$), tingkat kesulitan workabilitas akan semakin tinggi apabila ada campuran tambah agregat (misalnya tambahan serat). Oleh karena itu dibutuhkan bahan campuran berupa bahan kimia untuk mereduksi air (plasticizer). Bahan ini berfungsi untuk memudahkan workabilitas campuran beton tanpa mempengaruhi kualitas maupun setting time-nya.

Plasticizer yang dijual dipasaran ada 3(tiga) jenis yaitu :

- a. Kondensasi sulfonate melamin formaldehid dengan kandungan klorida sebesar 0,005%

- b. Sulfonatnaftalin formaldehid dengan kandungan klorida yang dapat diabaikan
- c. Modifikasi lignosulfonat tanpa kandungan klorida

Ketiga jenis bahan tambahan ini dibuat dari sulfonate organik dan disebut *superplasticizer* karena bahan ini dapat banyak mengurangi air pada campuran beton sementara slump beton dapat bertambah sampai 8 in (208mm) atau lebih. Dosis yang disarankan adalah 1 sampai 2% dari berat semen, sedangkan dosis yang berlebihan dapat menyebabkan berkurangnya tekan beton.

2.2. Beton mutu tinggi (High Strength concrete/HSC)

2.2.1. Perkiraan mutu beton yang akan digunakan pada penelitian ini

Menurut Prof. Lorrain (1991) menyebut klasifikasi mutu beton seperti berikut :

$20 < f_c' < 50$ Mpa disebut beton normal (NSC)

$50 < f_c' < 80$ Mpa disebut beton mutu tinggi (HSC)

$f_c' > 80$ Mpa disebut beton mutu sangat tinggi (VHSC)

Buletin CEB No 228 menetapkan bahwa, beton termasuk klasifikasi mutu tinggi apabila $f_c' > 50$ Mp. Beton dengan $f_c' > 50$ Mpa dikategorikan beton mutu tinggi.

Mengacu dari referensi dari peraturan yang berlaku maka dalam penelitian ini direncanakan (perkiraan) untuk membuat benda uji dengan mutu beton $f_c = 70$ Mpa.

2.2.2. Pemilihan nilai slump

Nilai slump yang ditetapkan oleh ACI adalah :

- Tanpa HRWR = 50 -100 mm
- Dengan HRWR = 25 -50 mm (sebelum penambahan HRWR)

HRWR = High Range Water Reducing (seperti superplasticizer)

2.2.3. Pemilihan ukuran agregat maksimum

Untuk beton mutu tinggi ditentukan berdasarkan mutu rencana.

- Mutu < 62 Mpa = 19 – 25 mm
- Mutu > 62 Mpa = 9,5 – 12,5 mm

Saat menggunakan HRWR, dapat dicapai dengan agregat kasar > 25 mm.

2.2.4. Perkiraan volume agregat kasar

Berdasarkan kondisi kering persatuan volume beton, kemudian berat agregat kasar padat adalah perkalian volume agregat kasar kondisi kering padat tersebut dengan berat isi kering padat agregat kasar. Berat agregat kasar kering (oven – dry) = volume agregat kasar dikalikan berat volume kering agregat kasar.

Tabel II.1. Volume agregat kasar kondisi kering padat

Ukuran maksimum agregat kasar (mm)	Volume agregat kasar kondisi kering padat
9,5	0,65
12,5	0,68
19	0,72
25	0,75

2.2.5. Perkiraan jumlah air dan udara tertahan dalam beton

Jumlah air tiap satuan volume beton tergantung dari ukuran maksimum agregat pembentuk partikel, kualitas semen dan tipe HRWR. Perbandingan kebutuhan air dengan agregat kasar seperti yang ditampilkan dalam tabel II.2.

Tabel II.2. Perkiraan jumlah air dan udara terperangkap dengan kadar air

Slump	Campuran air (kg/m ³)
	Ukuran agregat kasar maksimum

(mm)	9,5	12,5	19	25
25 – 50	184	175	169	166
50 -75	190	184	175	172
75 – 100	196	190	181	178
Udara (%)	3,0	2,5	2,0	1,5
Udara (%) *	2,5	2,0	1,5	1,0

*dengan HRWR

2.2.6. Pemilihan koefisien rasio air/bahan semen

Rasio air semen ditentukan berdasarkan kuat tekan rencana rata –rata dan ukuran maksimum agregat kasar, dimana kuat tekan rencana rata – rata adalah kuat tekan rencana ditambah 10 Mpa.

Tabel II.3. Rasio air semen, untuk beton tanpa HRWR

Kuat tekan rencana rata – rata (fcr')		Rasio air semen			
		Ukuran agregat kasar maksimum (mm)			
		9.5	12.5	19	2.5
48	28 hari	0.42	0.41	0.4	0.39
	56 hari	0.46	0.45	0.44	0.43
55	28 hari	0.4	0.34	0.33	0.33
	56 hari	0.38	0.37	0.36	0.35
62	28 hari	0.30	0.29	0.29	0.28
	56 hari	0.33	0.32	0.31	0.30
66	28 hari	0.26	0.26	0.25	0.25
	56 hari	0.29	0.28	0.27	0.26

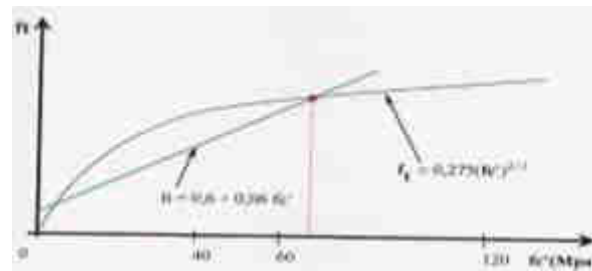
2.3. Beton Mutu Tinggi

2.3.1. Kriteria beton mutu tinggi

Sifat-sifat beton pada kondisi padat, yang penting dalam praktek adalah kekuatan karakteristik dari stress-strain, susut (shrinkage) dan rangkai, reaksi terhadap suhu, keawetan, dan sifat kedap air.

Untuk beton mutu tinggi, tidak semata-mata diartikan kualitas yang berorientasi high strength concrete, tetapi harus diartikan secara lebih luas yaitu meliputi : kekuatan, keawetan, tingkat pengerjaan dan sebagainya secara

menyeluruh. B. Fourie dan kawan – kawan menyatakan, bila ditinjau dari tegangan tariknya beton cenderung mempunyai klasifikasi mutu tinggi setelah mencapai $f_c' > 60$ Mpa. Hubungan antara tegangan tekan f_c' dan tegangan tarik f_t digambarkan dalam grafik berikut :



Gambar: 2.1. Hubungan antara tegangan tekan f_c' dan tegangan Tarik f_t

2.3.2. Kuat tekan beton mutu tinggi

Beton mutu tinggi (High Strength Concrete = HSC) adalah beton yang memiliki kuat tekan (compression strength) antara 50 – 80 Mpa. SK SNI T-15-1991-03 tidak menentukan secara jelas berapa kuat tekan yang dikategorikan dalam beton normal, tinggi dan sangat tinggi. Sifat – sifat fisik dan mekanik beton mutu tinggi sangat penting untuk diketahui. Penelitian tentang sifat – sifat fisik dan mekanik beton mutu tuinggi dengan bahan normal telah banyak dilakukan. Diantaranya dilakukan oleh L.S Hsu dan C.T.T. Hsu pada tahun 1994. Perilaku mekanik beton antara lain adalah hubungan tegangan – tegangan, dimana diagram ini dapat menggambarkan modulus, elastisitas, regangan puncak, tegangan maksimum, dan tegangan – regangan batas. Kuat5 tekan yang digambarkan merupakan kuat tekan rata – rata dari sejumlah benda uji kubus atau silinder. ACI

4.3.2 mengambil nilai dari 30 benda uji dengan rumus sebagai berikut :

$$F_{cr}' = f_{c'} + 1,34 \cdot s \dots\dots\dots (13)$$

Dimana : f_{cr}' = kuat tekan karakteristik dari benda uji beton

$f_{c'}$ = kuat tekan rata – rata

s = standard deviasi pengujian

sebagai gambaran, berikut diberikan grafik peningkatan kekuatannya tekan beton terhadap umur tertentu.

2.3.3. Kuat tarik (splitting)

Kuat tarik beton merupakan suatu bagian yang terpenting dalam menahan retak akibat perubahan kadar air, suhu dan pembebanan. Kuat tarik yang sebenarnya diperoleh dari uji tarik uniaksial (direct tensile test) atau splitting test (uji belah). Uji ini menggunakan benda uji silinder 10 X dan hasilnya dievaluasi dengan rumus :

$$f_t' = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot L} \dots\dots\dots (14)$$

Dimana : P = beban tekan

D = diameter silinder (10 cm)

L = panjang silinder (20 cm)

ASTM C 496 yang mengatur cara pengujian ini memberikan nilai prediksi besarnya kuat tarik beton sebesar 10% - 15% dari kuat tekan yaitu:

$$f_{ct} = 0,5 \sqrt{f_{c'}} \text{ sampai } 0,6 \sqrt{f_{c'}} \text{ Mpa} \dots\dots\dots (15)$$

2.3.4. Kuat geser

Pada beton struktur, didaerah yang besar gaya gesernya terjadi tegangan diagonal oleh tegangan tarik utama yang menyebabkan terjadinya retak miring mendekati sudut 45°.

kekuatan geser ini terjadi karena adanya pengaruh geser yang lebih dominan dari pada lentur.

Kuat geser lebih sulit ditentukan secara eksperimental dan secara teori, karena beton sangat lemah menerima geser dan sulit untuk melakukan pembebanan yang hanya menerima geser murni tanpa lentur. Menurut ACI 318-83M, kuat geser pada balok beton tanpa tulangan nilainya dapat dihitung berdasarkan rumus :

$$V_c = \frac{1}{6} \left(\sqrt{f_c'} + 100 \frac{\rho_u \cdot V_u \cdot d}{M_u} \right) b_w \cdot d \leq 0,3 \sqrt{f_c'} \cdot b_w \cdot d \quad (16)$$

Sedangkan SK SNI T-15-1991-03 memberikan batasan nilai kuat geser beton sebagai berikut :

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f_c'} \cdot b_w \cdot d \dots\dots\dots (17)$$

2.3.5. Modulus elastisitas

ASTM C 469-87A menentukan bahwa nilai modulus elastisitas diambil dari 40% tegangan dari beban maksimum. Sedangkan ACI 318-89 menentukan bahwa nilai modulus elastisitas dapat diambil melalui perbandingan antara 45% tegangan maksimum terhadap regangan yang terjadi pada kondisi tegangan tersebut. Menurut Wang & Salmon (1990) menunjukkan hubungan tegangan – regangan non linier untuk tegangan 50% kuat tekan silinder beton. Hubungan tegangan – regangan dipergunakan untuk menurunkan persamaan – persamaan analisa dan desain prosedur pada struktur beton. Dari hubungan tersebut dapat ditentukan beberapa modulus elastisitas beton berdasarkan tinjauan yang berbeda yaitu : modulus tangential, modulus secant, dan modulus tangen.

Modulus elastisitas yang biasa dipakai adalah modulus

secan. SK SNI T-15-1991-03 menentukan besarnya nilai modulus elastisitas sebagai berikut : $E_c = 0,043 \sqrt{f_c'} (Wc)^{3/2}$ untuk $f_c' < 50$ Mpa (18)

ACI menentukan: $E_c = 4700 \sqrt{f_c'}$ sampai $5000 \sqrt{f_c'}$... (19)

2.3.6. Kuat lentur

Kuat lentur merupakan bagian dari kekuatan tarik yang dapat diperoleh dari uji uniaxial. Tingkat ketelitian secara berturut – turut adalah uji uniaksial < dari uji belah < dari uji lentur. Wang dan Salmon (1990 :13) menyimpulkan bahwa kuat tarik hasil uji lentur dikenal dengan kuat lentur (flexural strength) atau modulus runtuh (modulus of rupture), hal ini sesuai dengan ASTM C 78 yang merumuskan modulus runtuh seperti berikut :

$$f_r = \frac{P.L}{b.d^2} \text{ (Mpa)} \dots\dots\dots (20)$$

ACI 9.5.2.3 mengambil nilai rata – rata kuat lentur tersebut sebesar : $f_r = 0,62 \sqrt{f_c'} \text{ (Mpa)}$ (21)

Sedangkan SK SNI T-15-1991-03 memberikan rumus :

$$f_r = 0,7 \sqrt{f_c'} \text{ (Mpa)} \dots\dots\dots (22)$$

2.3.7. Susut dan rangkai

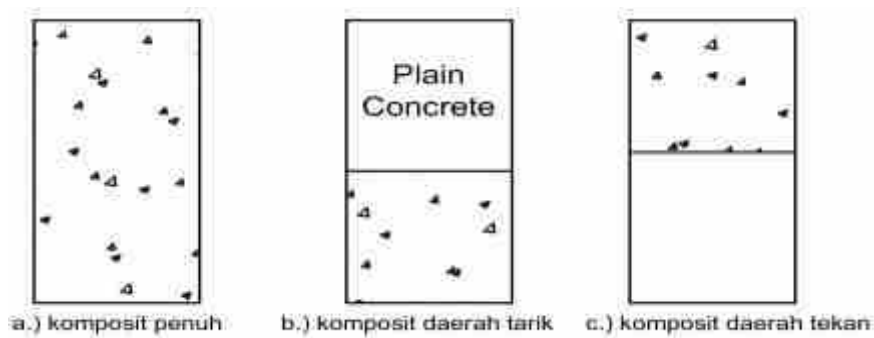
- a. Susut : Secara umum beton mutu tinggi karena factor komposisinya mempunyai susut total lebih kecil dari beton bertegangan normal. Menurut PONS, untuk beton mutu tinggi susut total berkisar 3.10^{-4} pada kondisi $R_h = 50\%$, sedang untuk beton biasa susut totalnya berkisar 5.10^{-4} pada R_h yang sama.

- b. Rangkak : seperti halnya pada susut gejalaanya hamper identic. Suatu hal yang sangat penting diperhatikan bahwa pembebanan beton mutu tinggi pada umur relative muda harus sedapat mungkin dihindari. Secara keseluruhan beton ini mempunyai sifat rangkak lebih baik disbanding beton normal.

III. BETON FIBER KOMPOSIT

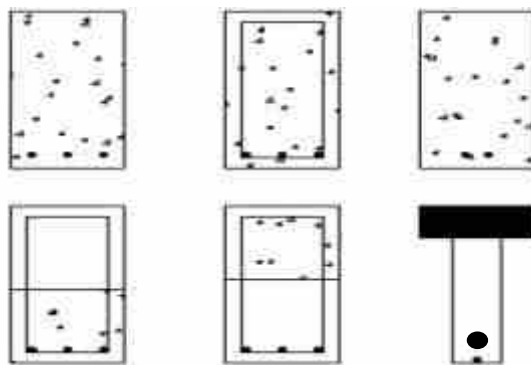
Beton fiber, selain berbeda dari jenis bahan fibernya, juga bisa berbeda dalam bentuknya meskipun dibuat dari bahan yang sama. Beberapa macam aplikasi beton fiber komposit (contoh pengenalan) :

3.1. Beton fiber komposit tanpa baja tulangan



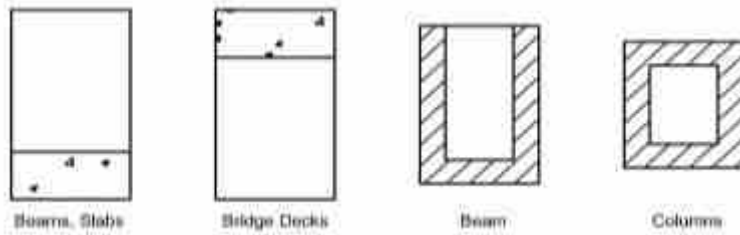
Gambar: 3.1. Penampang beton fiber komposit tanpa tulangan

3.2. Kombinasi dengan tulangan dan pratekan



Gambar: 3.2. Penampang kombinasi dengan tulangan dan pratekan

3.3. Dipakai pada perbaikan dan rehabilitasi



Gambar: 3.3. Penampang fiber komposit pada perbaikan dan rehabilitasi

3.4. Perilaku mekanik beton fiber

3.4.1. Mekanisme kontribusi serat terhadap beban tekan

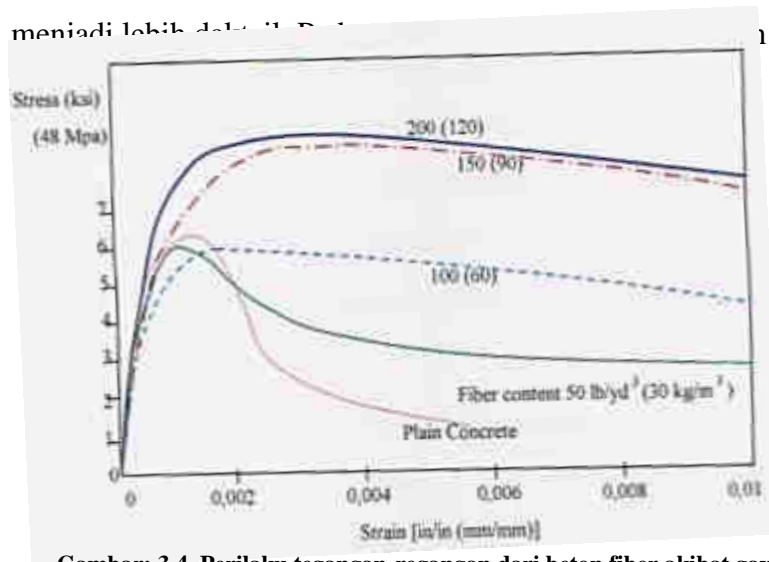
Parameter yang didapat dengan pengujian tekan terhadap beton berserat antara lain adalah modulus elastisitas, beban hancur maksimum. Dengan melakukan pencatatan terhadap defleksi maka didapatkan nilai regangan yang terjadi pada saat beban maksimum dan perilaku – perilaku kurva beban P dengan defleksi (δ) atau perilaku kurva tegangan regangan. Perubahan modulus elastisitas akibat pengaruh penambahan serat sangat kecil sehingga dapat diabaikan, tetapi percobaan ini tetap dilakukan untuk membuktikan dan mencari korelasinya dengan kuat tekan. Penambahan serat pada beton normal dapat meningkatkan tegangan pada beban puncak. Beton berserat dapat menyerap energi lebih besar dari pada beton normal sebelum hancur (failure). Peningkatan terhadap daktilitas dengan penambahan serat pada beton normal tergantung dari beberapa faktor, antara lain :

- a. Volume fraction dari fiber.
- b. Geometri dari fiber.
- c. Komposisi bahan penyusun matrik itu sendiri.

Peningkatan volume fiber dapat meningkatkan kapasitas energi yang diserap, sedangkan peningkatan energi ini terjadi

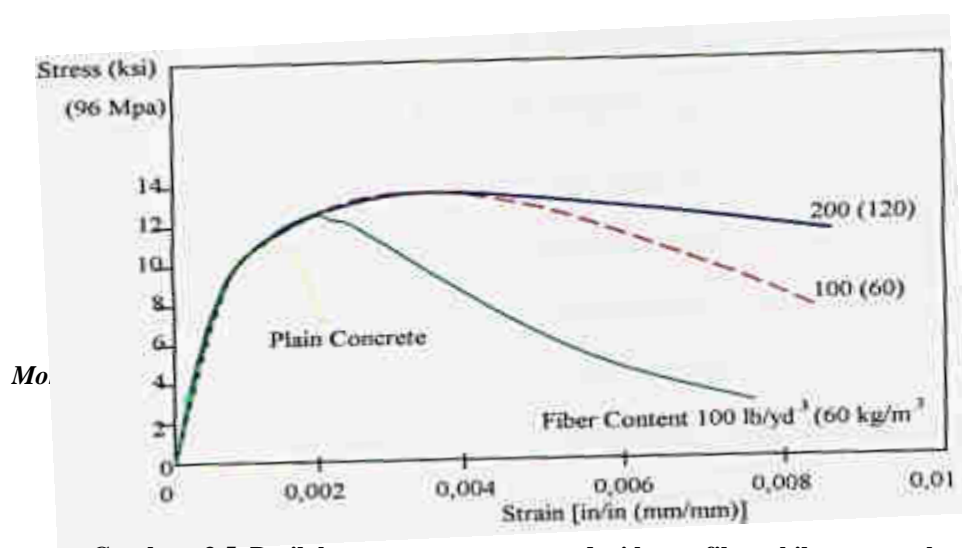
hanya pada batasan 0 – 0,7% volume fraction. Apabila kandungan fiber dinaikan lagi hingga mencapai volume fraction lebih besar dari 0,7 %, kenaikan energi yang terjadi tidak terlalu besar.

Beton mutu tinggi lebih getas (brittle) dari pada beton mutu normal, maka dengan penambahan fiber, beton tersebut akan menjadi lebih daktil.



Gambar: 3.4. Perilaku tegangan-regangan dari beton fiber akibat gaya tekan pada beton mutu normal (Sumber: Balguru & Shah, 1992)

perilaku dari penambahan fiber pada beton mutu normal dan beton mutu tinggi, masing – masing pada gambar III.4. Menunjukkan perilaku tegangan – regangan dari beton fiber akibat gaya tekan pada beton mutu normal, dan gambar III.5. Menunjukkan perilaku tegangan – regangan dari beton fiber akibat gaya tekan pada beton mutu tinggi.



Gambar: 3.5. Perilaku tegangan-regangan dari beton fiber akibat gaya tekan pada beton mutu tinggi (Sumber: Balguru & Shah, 1992)

Pada gambar 3.5. terindeksi dengan jelas bahwa beton mutu tinggi lebih getas (brittle) dari pada beton mutu normal. Kurva untuk beton mutu tinggi tanpa serat bila dibebani, pada kondisi setelah beban mencapai maksimum langsung jatuh dengan curam kebawah. Dengan pembebanan serat maka kurva tersebut berubah menjadi lebih landai, hal ini menandakan bahwa beton dengan memakai serat lebih daktil dari pada beton tanpa serat.

3.4.2. Kontribusi fiber terhadap perilaku tegangan – regangan

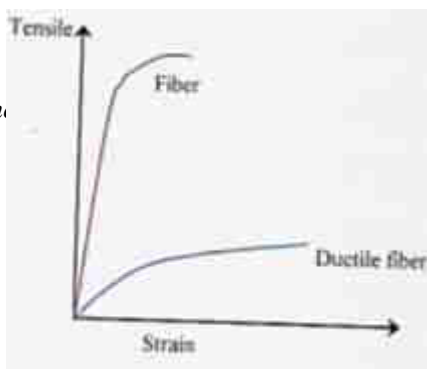
Menurut Shah, kontribusi serat terhadap tegangan – regangan beton dibedakan atas dua macam, yaitu :

1. Serat sangat getas dengan matrik yang daktil, ditunjukkan pada gambar III.7. dimana terlihat bahwa regangan runtuh matrik jauh lebih besar dibanding dengan regangan runtuh fiber.
2. Serat sangat kuat dengan matrik yang getas ditunjukkan pada gambar III.8. terlihat bahwa kapasitas regangan batas matrik lebih rendah dari kapasitas regangan serat. Matrik akan runtuh sebelum seluruh potensi fiber bekerja, matrik yang telah retak ditahan oleh fiber yang berkontribusi energi melalui proses debonding dan serat tercabut. Setelah matrik retak, kemungkinan perilaku

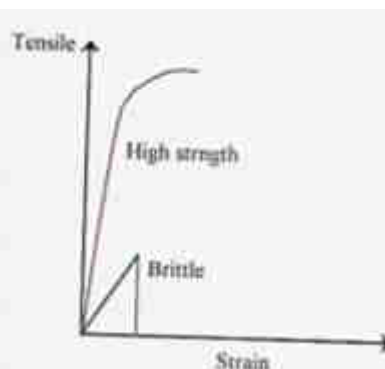
beton fiber komposit seperti digambarkan pada figur III.8.

a), b), dan c) dengan penjelasan sebagai berikut :

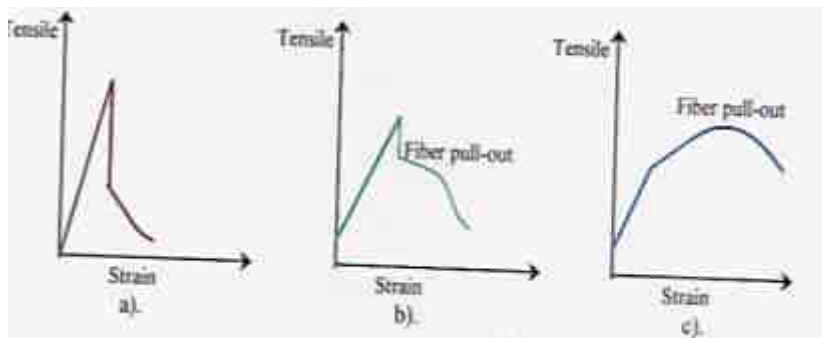
- a) Tipe keruntuhan beton dengan runtuh secara drastis sesudah matrik retak disebabkan oleh kandungan serat yang sangat rendah.
- b) Setelah matrik retak, kapasitas kemampuan memikul beban menurun tetapi beton masih mampu meneruskan memikul beban yang lebih kecil dari beban maksimum. Pada saat matrik retak beban dipindahkan dari beton ke fiber, sehingga untuk memikul beban hanya tinggal tergantung kemampuan memikul beban dari serat saja. Dengan bertambahnya deformasi maka serat tercabut dari matrik, sehingga kapasitas beton fiber memikul beban akan terus menurun. Tipe fiber beton ini menunjukkan penambahan kekuatan yang melebihi kekuatan matrik dan menunjukkan perilaku daktail..
- c) Jika prosentasi volume fiber terhadap matrik bertambah besar, maka sesudah matrik retak fiber akan mulai memikul penambahan beban. Bila cukup banyak serat yang menjembatani retak matrik, beton fiber akan sanggup meneruskan memikul beban yang lebih tinggi dari beban pada retak awal. Perilaku dari kurva tegangan – regangan menurun karena hilangnya kontribusi matrik. Kemiringan kurva sesudah terjadi retakan tergantung dari fiber
- d) dan kapasitas lekatan fiber pada matrik. Ketika fiber mulai tercabut atau putus kemiringan kurva dapat mencapai nol, dan kapasitas kemampuan memikul beban mulai menurun. Tipe keruntuhan ini memungkinkan pemanfaatan sifat fiber dan matrik secara maksimum.



Gambar: 3.6. Curva tegangan-regangan serat dengan matrix daktil(Sumber: Balguru & Shah, 1992)



Gambar: 3.7. Curva tegangan-regangan serat dengan matrix getas (Sumber: Balguru & Shah,



Gambar: 3.8. Curva tegangan-regangan beton fiber dengan matrix getas
(Sumber: Balguru & Shah, 1992)

3.4.3. Daktilitas

Penambahan serat pada beton merupakan salah satu cara untuk meningkatkan kapasitas penyerpan energi dari matrik yang berarti juga dapat meningkatkan daktilitas beton.

Daktilitas adalah kemampuan suatu struktur atau elemen struktur untuk melawan respon in – elastis yang dominan sambil mempertahankan sebagian besar dari kekuatan awalnya dalam memikul beban. Penambahan daktilitas juga berarti peningkatan perilaku beton terhadap kelelahan (fatigue) dan daya kejut (impact). Faktor utama yang mempengaruhi kurva beban defleksi adalah tipe serat, geometri serat, volume serat, komposisi bahan penyusun matrik, ukuran benda uji, konfigurasi pembebanan, kecepatan pembebanan, keakurasian alat ukur defleksi (dial).

Daktilitas ini terdiri dari daktilitas : regangan, kelengkungan, perpindahan, dan daktilitas rotasi, yang masing – masing dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini :

a) Daktilitas regangan : $\mu_\epsilon = \epsilon_u/\epsilon_y$ (19)

b) Daktilitas kelengkungan : $\mu_\phi = \phi_u/\phi_y$ (20)

c) Daktilitas defleksi : $\mu_\delta = \delta_u/\delta_y$ (21)

d) Daktilitas rotasi $\mu_\theta = \theta_u/\theta_y$ (22)

Pada beton tanpa baja tulangan perhitungan daktilitas dilakukan terbatas pada daktilitas material betonnya saja, dan pada beton fiber mungkin juga akan menemui beberapa kesulitan karena fiber tidak dapat berfungsi persis seperti fungsi baja tulangan. Namun demikian akan dicoba melakukan dengan cara pendekatan perilaku hasil uji test eksperimental dipadukan dengan cara analitis.

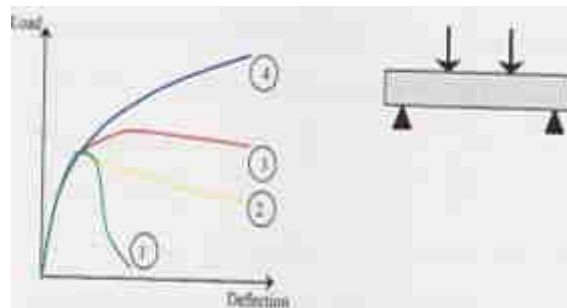
3.4.4. Mekanisme kontribusi fiber terhadap beban lentur

Beberapa penelitian yang telah dilakukan dengan menggunakan benda uji balok 10 cm x 1 cm x 35 cm yang dibebani tiga titik pembebanan untuk mengetahui perilaku penambahan fiber ini akibat beban lentur. Hasil dari percobaan tersebut peningkatan kuat lentur lebih tinggi dai pada kuat tekan maupun kuat tarik belah (spilting).

Dengan peningkatan nilai volume fraksi maka akan meningkat kuat lentur, begitu pula aspek ratio yang tinggi juga meningkatkan kuat lentur.

Mekanisme kontribusi serat terhadap perlawanan lentur dan daktilitas dapat dilihat dari perilaku beban defleksi dari beton tersebut. Pada III.9. ditunjukan kurva beban defleksi dari beton berserat dengan berbagai jenis fiber dan jumlah volume fraksi serat yang berbeda. Untuk beton dengan

volume serat yang lebih tinggi akan didapatkan kurva pincak yang lebih landai. Perbedaan perilaku distribusi tegangan dan regangan pada balok didaerah sebelum dan sesudah retak akibat pengaruh kontribusi serat. Pada kondisi awal perilaku kurva beban defleksi masih dalam daerah elastis sehingga diagram tegangan – regangan pada penampang balok dalam kondisi ini dapat diasumsikan linier. Jika volume fraksi serat rendah maka perilaku balok tersebut adalah balok lentur biasa.



Gambar: 3.9. Tipikal curva beban-defleksi beton fiber akibat lentur
(Sumber: Balguru & Shah, 1992)

Untuk kasus benda uji tarik, apabila beban meningkat maka tegangan maksimum akibat tekan maupun tarik terjadi peningkatan. Ketika tegangan tarik maksimum mencapai kekuatan tarik dari matrik itu maka akan terjadi retak. Saat matrik retak, distribusi tegangan yang melewati penampang melintang beton akan berubah secara drastis meskipun distribusi regangan dapat diasumsikan linier sampai retak melebar. Pada saat matrik retak, beban yang semula dipikul oleh matrik ditransfer ke serat. Perbedaan yang berarti antara balok dan benda uji tarik adalah gradien dari diagram distribusi regangan yang terjadi pada balok. Beberapa kasus perilaku ini kondisinya dapat diamati pada gambar III.9, penjelasan secara rinci sebagai berikut.

Kurva 1 :

Jika jumlah serat yang menjembatani retakan sedikit dan serat hanya mampu memikul sebagian kecil pecahan dari kekuatan yang dipikul oleh matrik sebelum terjadinya retak, maka kapasitas beton dalam menahan beban akan turun dengan tajam.

Kurva 1 dan 2 :

Memperlihatkan bila jumlah serat untuk memikul beban tarik memenuhi syarat. Kondisi pada kurva 1 dan 2 menunjukkan kekuatan yang dapat dipikul oleh serat lebih kecil dari kekuatan matrik sebelum retak, perilaku ini dinamakan *“load-softening behavior”*.

Kurva 3 dan 4 :

Menunjukkan bila serat mampu memberikan kekuatan yang sama atau lebih besar dari matrik pada daerah tawar sebelum retak, kapasitas kekuatan beton dapat bertambah. Pada kondisi ini manfaat penambahan serat tercapai.

Kurva 4 :

Kurva 4 menunjukkan bahwa jika volume fraksi lebih besar dari 10% maka fiber harusnya mempunyai kekuatan yang lebih tinggi dari kekuatan matrik beton sehingga kurva 4 dapat tercapai. Bila kondisi ini tercapai maka fiber berfungsi dengan sangat baik yang dapat mencapai kekuatan leleh melebihi kekuatan hancur beton. Kemampuan daya dukung fiber juga tergantung dari faktor lekatan antara fiber dan matrik, dimana bila fiber persentasinya lebih banyak yang tercabut (losses) dari matrik maka dipastikan sifat (perilaku) komposit antara fiber dan matrik akan mengalami kegagalan, demikian juga bila lekatan berhasil dengan baik

terjadi antara fiber dengan matrik maka sifat komposit bisa tercapai.

IV. REPAIR BETON DENGAN FIBER

Perbaikan pada struktur beton sering kali dilakukan baik pada saat pelaksanaan konstruksi dari suatu struktur ataupun pada struktur yang sudah beroperasi. Tujuan dari perbaikan yang dilakukan adalah untuk mengembalikan kondisi struktur tersebut kepada keadaan semula baik kapasitas kekuatan maupun fungsi, tanpa adanya penambahan kapasitas dari struktur dalam menahan beban.

Disisi lain dengan meningkatnya perekonomian di Indonesia, maka banyak struktur beton yang memerlukan peningkatan kapasitas dalam menahan beban, seperti struktur jembatan, sejalan dengan meningkatnya beban lalu lintas, ataupun struktur gedung yang beralih fungsi, atau mengalami kerusakan akibat kesalahan desain maupun kesalahan pelaksanaan struktur betonnya.

Untuk mendapatkan hasil perbaikan dan perkuatan struktur beton yang optimal, maka harus dilakukan tiga tahapan penting yaitu *investigasi, evaluasi* dan *pelaksanaan*.

Ketiga tahapan ini sangat penting dilakukan, dan tidak ada satu tahapanpun yang lebih penting daripada tahapan lainnya. Karena tanpa investigasi yang baik, maka kita tidak bisa melakukan evaluasi dengan benar, demikian juga tanpa evaluasi yang benar, maka perbaikan dan

Monograf Struktur Beton Fiber

perkuatan yang dilakukan juga tidak dapat mencapai sasaran yang telah ditetapkan, selanjutnya tanpa pelaksanaan yang baik, maka segala tahapan investigasi dan evaluasi yang sudah dilakukan dengan benar dan baik menjadi tidak berarti. Berikut diberikan contoh perbaikan dan perkuatan Plat Beton.

4.1. Analisa Struktur Plat Lantai Existing

4.1.1. Standard beban yang bekerja pada lantai dan Properti

- Beban hidup untuk ruang kelas sesuai SNI-03-1727-2002 = $2,50 \text{ kN/m}^2$
- Beban mati : - Lapisan lantai keramik + spesi = $1,20 \text{ kN/m}^2$
- Berat sendiri plat = $0,12 (24) = 2,88 \text{ kN/m}^2$
- Total Beban mati (dead load) = $4,08 \text{ kN/m}^2$

Beban berfaktor plat lantai :

- Beban hidup plat lantai = $1,60 (2,50) \dots = 4,00 \text{ kN/m}^2$
- Beban mati = $1,20 (4,08) \dots = 4,90 \text{ kN/m}^2$
- Total beban $q_{u\text{plat}} = 8,90 \text{ kN/m}^2$

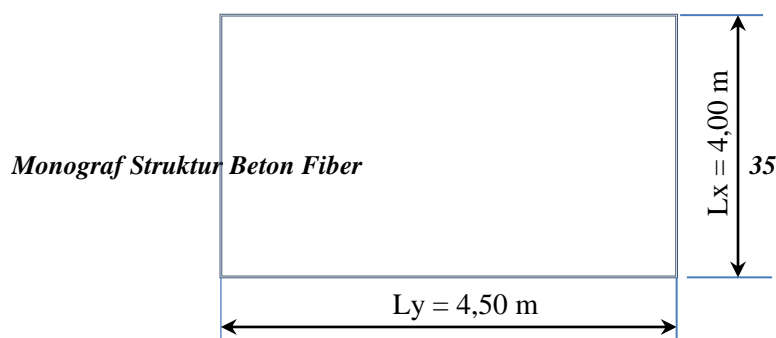
Properti dari material :

- Kuat tekan beton $f_c' = 25 \text{ MPa}$: baja tulangan plat dipakai $\varnothing 10$
- Kuat leleh baja $f_y = 280 \text{ MPa}$; Tebal plat lantai $h = 120 \text{ mm}$

4.1.2. Analisa kapasitas struktur existing

Momen plat yang bekerja :

$$\frac{L_y}{L_x} = \frac{4,50}{4,00} = 1,13$$



Gambar:4.1. Skema Plat terjepit elastis 4 sisi

Karena system plat lantai menerus, maka dipakai table plat terjepit elastis 4 sisi : $t_x = l_x$ $t_x = l_x = 48$ (interpolasi)

$t_y = l_y$ $t_y = l_y = 47$ (interpolasi)

$$\begin{aligned} \text{Momen-momen : } M_{tx} &= M_{lx} = 0,001(q_u) \cdot l_x^2 \cdot x \\ &= 0,001 (8,90) \cdot 4^2 \cdot 48 = 6,84 \text{ kNm/m} \end{aligned}$$

$$M_{ty} = M_{ly} = 0,001(q_u) \cdot l_y^2 \cdot x = 0,001(8,90) \cdot 4^2 \cdot 47 = 6,70 \text{ kNm/m}$$

Tinggi efektif plat : $d_x = 120 - 20 - 1/2(10) = 120 - 20 - 5 = 95 \text{ mm}$

$d_y = 120 - 20 - 10 - 1/2(10) = 120 - 20 - 10 - 5 = 85 \text{ mm}$

Penulangan arah L_x :

$$\rho_b = \frac{\beta_1 \cdot 0,85 \cdot f_{c'} \left(\frac{600}{600 + f_y} \right)}{f_y} = \frac{0,85 \cdot 0,85 \cdot 25 \left(\frac{600}{600 + 280} \right)}{280} = 0,043$$

$$\rho_{\max} = 0,75 \cdot \rho_b = 0,75 (0,043) = 0,032$$

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y} = \frac{1,4}{280} = 0,005$$

$$M_{n\text{perlu}} = \frac{M_{u_x}}{\phi} = \frac{6,84}{0,8} = 8,55 \text{ kNm/m}$$

$$R_n = \frac{M_{n\text{perlu}}}{b \cdot d^2} = \frac{8,55 \cdot 10^6}{1000 \cdot 95^2} = 0,947$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 \cdot f_{c'}} = \frac{280}{0,85 \cdot 25} = 13,18$$

$$\rho_{\text{perlu}} = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2m \cdot R_n}{f_y}} \right) = \frac{1}{13,18} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 13,18 \cdot 0,947}{280}} \right) =$$

0,0035

$\rho_p < \rho_{\min}$, dipakai $\rho_{\min} = 0,005$

$$A_s = \rho_{\min} \cdot b \cdot d_x = 0,005(1000) \cdot 95 = 475 \text{ mm}^2$$

Dipakai tulangan $\varnothing 10 - 150 = 524 \text{ mm}^2 > 475 \text{ mm}^2 \dots (\text{OK})$

Penulangan arah Ly :

$$M_{nperlu} = \frac{Mu_y}{\phi} = \frac{6,70}{0,8} = 8,38 \text{ kNm/m}$$

$$R_n = \frac{M_{nperlu}}{b.d^2} = \frac{8,38.10^6}{1000.85^2} = 1,16$$

$$m = \frac{fy}{0,85.f_c'} = \frac{280}{0,85.25} = 13,18$$

$$\rho_{perlu} = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2m.R_n}{fy}} \right) = \frac{1}{13,18} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2.13,18.1,16}{280}} \right) =$$

$$0,0043$$

$$\rho_p < \rho_{min}, \text{ dipakai } \rho_{min} = 0,005$$

$$A_s = \rho_{min} \cdot b \cdot dx = 0,005(1000).85 = 425 \text{ mm}^2$$

$$\text{Dipakai tulangan } \varnothing 10 - 150 = 524 \text{ mm}^2 > 425 \text{ mm}^2 \dots (\text{OK})$$

Kapasitas momen plat :

$$\text{Arah Lx : } T = A_s \text{ ada. } fy = 524(280) = 146720 \text{ N}$$

$$a = \frac{T}{0,85.b.f_c} = \frac{146720}{0,85.1000.25} = 6,90 \text{ mm}$$

$$M_n = T \left(dx - \frac{a}{2} \right) = 146720 \left(95 - \frac{6,90}{2} \right) 10^{-6} = 13,43 \text{ kNm}$$

$$\phi M_n = 0,8 (13,43) = 10,74 \text{ kNm} > M_u = 6,84 \text{ kNm} \dots (\text{OK})$$

$$\text{Arah Ly : } T = 146720 \text{ N ; } a = 6,90 \text{ mm}$$

$$M_n = T \left(dy - \frac{a}{2} \right) = 146720 \left(85 - \frac{6,90}{2} \right) 10^{-6} = 11,97 \text{ kNm}$$

$$\phi M_n = 0,8 (11,97) = 9,57 \text{ kNm} > M_u = 6,70 \text{ kNm} \dots (\text{OK})$$

4.1.3. Kondisi tulangan terpasang dalam Pelaksanaan

Tulangan lapangan terpasang $\varnothing 10 - 150$

Tulangan tumpuan terpasang $\varnothing 10 - 300$, dengan luas tulangan

$$A_s = 262 \text{ mm}^2$$

$$\text{Kekurangan Luas tulangan tumpuan} = 524 - 262 = 262 \text{ mm}^2$$

Kapasitas Momen tumpuan terpasang :

$$a = \frac{T}{0,85.b.f_c} = \frac{262 \cdot 280}{0,85.1000.25} = 3,45 \text{ mm}$$

$$M_n = A_s \cdot f_y (d_x - a/2) = 262 \cdot 280 (95 - 3,45/2) \cdot 10^{-6} = 6,80 \text{ kNm/m}$$

$$\phi M_n = 0,8 (6,80) = 5,44 \text{ kNm} < M_u = 6,84 \text{ kNm} \dots (\text{not OK})$$

Kondisi tulangan terpasang inilah penyebab retaknya (Crack) pada pertemuan tumpuan plat lantai dengan balok pendukungnya.

$$\text{Kekurangan kapasitas momen tumpuan} = 6,84 - 5,44 = 1,40 \text{ kNm/m}$$

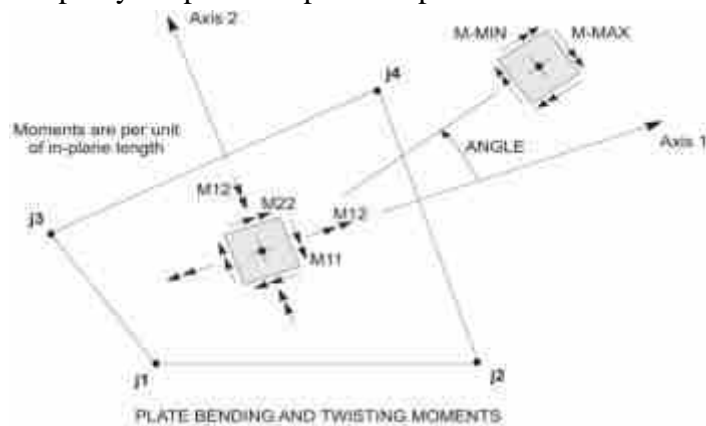
Untuk mengatasi kekurangan ini akan dilakukan perkuatan dengan memasang material CFRP plate type S512.

Total kekurangan momen kapasitas terpasang sepanjang tumpuan X :

$$M_n = 1,40 \cdot 4,5 = 6,30 \text{ kNm}$$

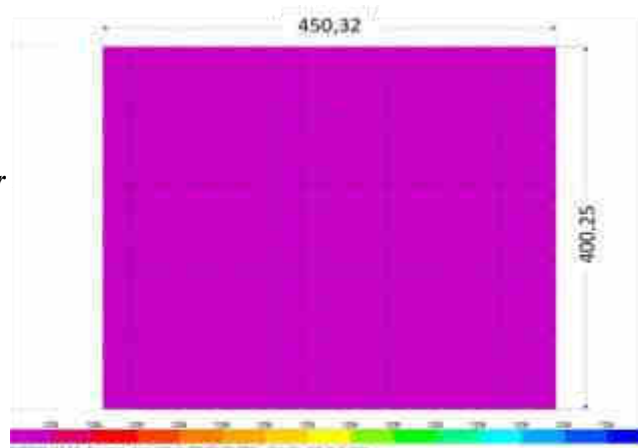
4.2. Analisa Statika dengan Soft-ware.

Analisa secara Numerik dilakukan dengan Soft-ware Structure Analysis Program (SAP 2000). Setelah membuat pemodelan plat, kemudian mengimput beban dan property, maka hasil out-putnya dapat ditampilkan seperti berikut.

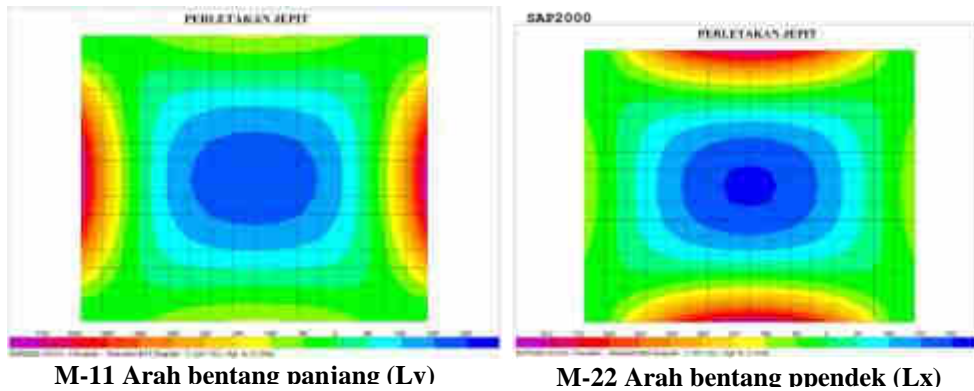


Gambar:4.2. Shell Element Stress and Internal Forces

Monograf Struktur



Gambar:4.3. Discrete Plat Lantai



Gambar:4.4. Deformasi lentur arah bentang Ly dan Lx

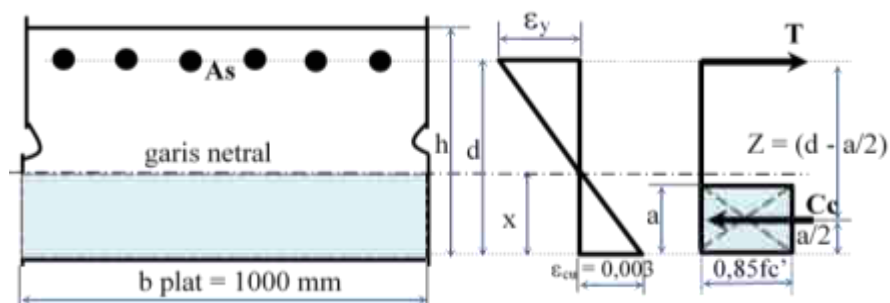
4.3. Analisa kebutuhan CFRP plate dan Material Patching Mortar

Properti CFRP : - Kuat Tarik (Tensile Strength) = 310 N/mm^2

- Modulus Elastisitas (E) = 230 kN/mm^2 ; Density = 1,8

Properti Patching Mortar : - Sikadur 30 Normal.

Diagram block tegangan beton pada tumpuan :



Gambar: 4.5. Diagram block Tegangan Plat Beton

Berdasarkan kapasitas kuat Tarik CFRP, maka M_n sisa sebesar 6,30 kNm yang harus dipikul oleh CFRP ini akan dikonversi menjadi gaya Tarik.

$$T = M_n / (d - a/2) = 6,30 \cdot 10^6 / (95 - 1,725) = 67542 \text{ N}$$

Dimensi penampang CFRP 1,2/100 mm, maka luas penampang = $1,2(100) = 120 \text{ mm}^2$

$$\text{Kapasitas satu batang CFRP} = 120 (310) = 37200 \text{ N}$$

Kebutuhan satu segmen plat lantai = $67542 / 37200 = 1,81 \approx 2$ batang.

Dipasang 2 batang CFRP dengan panjang 1,20 m dan jarak antar batang diambil 0,70 m. Skema pemasangan dapat dilihat pada gambar 3.2 berikut.

Peningkatan kapasitas dengan penambahan 2 CFRP = $37200(95 - 1,752) \cdot 10^{-6} \cdot (2) = 6,93 \text{ kNm}$. Kapasitas momen $M_n/m = 6,93 / 4,50 = 1,54 \text{ kNm/m}$.

Total Kapasitas momen $M_n = 5,44 + 1,54 = 6,98 \text{ kNm} > M_u = 6,84 \text{ kNm} \dots (\text{OK})$.



Gambar :4.6.Detail I, Aplikasi CFRP

4.4. Metode Uji Tarik CFRP

4.4.1. Pembuatan Spesimen CFRP

Prosedur pembuatannya mengikuti ketentuan American Standard Testing Materials (ASTM) D 3039/D

3039M-00, dengan jumlah ganjil minimum 3 (tiga sampel).

Dalam penelitian ini dibuat 7 buah sampel dengan ukuran seperti tercantum dalam tabel berikut.

Tabel : IV.1. Dimensi dan jumlah Spesimen CFRP.

No.	Nama/Jenis Spesimen	Fungsi	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Panjang (mm)
1	Carbon Fiber Reinforcement Polymer (CFRP)	Sebagai pengganti tulangan tarik/lentur	1,20	15,40	250,00
2			1,20	15,00	250,00
3			1,20	15,25	250,00
4			1,20	14,70	250,00
5			1,20	15,00	250,00
6			1,20	14,50	250,00
7			1,20	14,90	250,00

Standard dimensi sebenarnya 1,20 X 15,00 X 250,00 mm, tetapi ukuran yang tertera dalam daftar table tidak bias tepat sesuai standard. Penyebabnya adalah kesulitan membentuk secara tepat karena lempengan plat terdiri dari serat, maka serat tepi lempeng plat sering terlepas sehingga lebarnya tidak bisa tepat selebar 15,00 mm, namun demikian ukuran lebarnya masih dalam toleransi. Proses pembuatan Spesimen CFRP di visualisasi seperti berikut ini.



Gambar :4.7 Plat CFRP ukuran 1,20 X 50,00 X 1000 mm



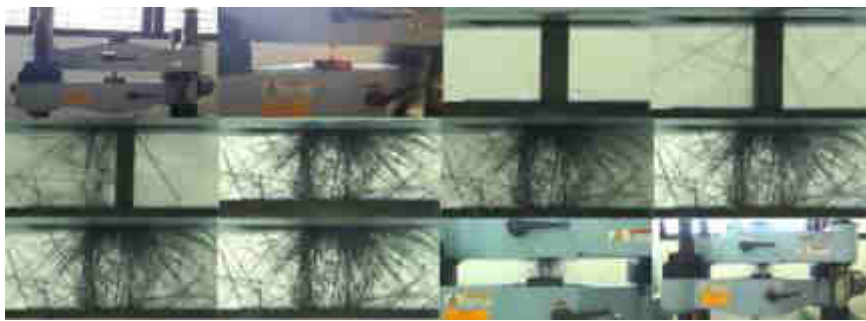
Gambar :4.8. Proses pemotongan CFRP



Gambar :4.9. Spesimen CFRP yang sudah terbentuk (7 buah)

4.4.2. Pengujian Spesimen pendahuluan dilaboratorium.

Pengujian specimen secara satu persatu menggunakan mesin uji Tarik Universal Testing Machine (UTM), kapasitas 500 kN. Dari 7 Spesimen yang diuji yang berhasil baik sebanyak 5 Spesimen, sedangkan yang 2 Spesimen mengalami kegagalan akibat slip pada jepitan ujung Spesimen. Meskipun ada 2 Spesimen yang gagal, namun masih memenuhi persyaratan karena sudah lebih dari 3 Spesimen dan jumlahnya ganjil. Dokumen proses pengujian seperti gambar-gambar berikut.



Gambar : 4.10. Proses uji Tarik Spesimen CFRP

Setelah Spesimen dilepas dari mesin uji UTM, konfigurasi kembali dalam kondisi telah putus, sreabut-serabut pembentuk dari CFRP tersebut dapat terlihat dengan jelas, dan dokumentasinya dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



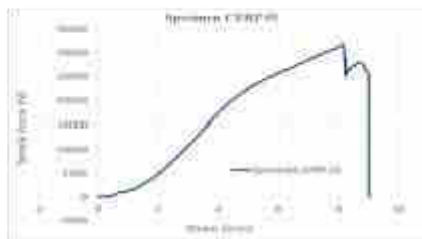
Gambar : 4.11. Arsip Spesimen CFRP yang sudah putus

Dari gambar dapat terbaca proses kerja Tarik yang diberikan pada Spesimen mulai dari awal sampai putus, setelah putus terlihat material Spesimen kmbali membentuk serat. Hasil uji Tarik disusun dalam table 4.2 sebagai berikut.

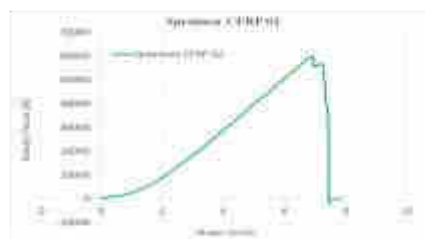
Tabel : 4.2. Hasil uji Tarik Spesimen CFRP.

No.	Dimensi Spesimen			Luas Penampang (mm ²)	Kuat Tarik max. (fs)			Kuat Tarik leleh (fy) (MPa)	Kuat Tarik Leleh Standard Produsen (MPa)	Regangan Maximum (%)
	Tabal (mm)	Lebar (mm)	Panjang (mm)		Gaya Tarik max. (kg)	Kg/mm ²	N/mm ² (MPa)			
1	1,20	15,00	250,00	18,00	5970,12	331,67	3253,72	3111	-	4,6133
2	1,20	15,25	250,00	18,30	6491,13	354,71	3479,67	3005		4,7000
3	1,20	14,70	250,00	17,64	5829,91	330,49	3242,14	3231		4,4807
4	1,20	15,00	250,00	18,00	5743,87	319,10	3130,41	2889		4,6240
5	1,20	14,90	250,00	17,88	6143,79	343,61	3370,84	3132		4,6513
Kuat Rata-rata					6035,76	335,92	3295,36	3073,60	2520,00	4,6140

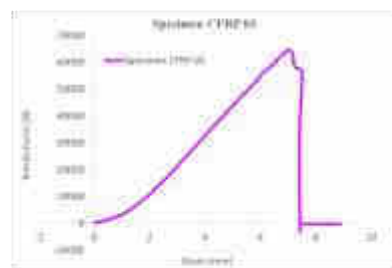
Nilai hasil kuat Tarik yang ditabelkan diatas, dapat dibuat grafik hubungan Tegangan-Regangan Tarik, berurutan dari Spesimen 1s/d 5 dan gabungan dari 5 Spesimen sebagai berikut.



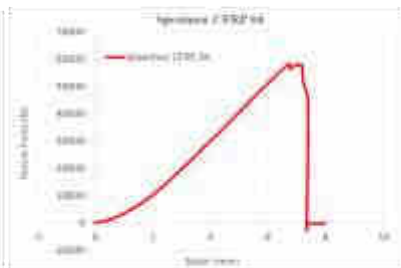
Gambar IV.12. Grafik Kuat Tarik Spesimen 1



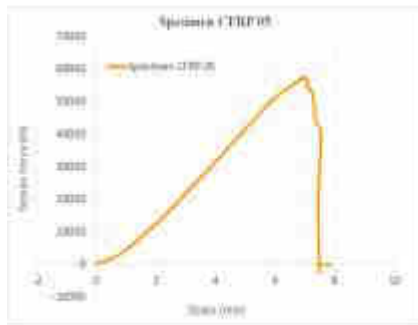
Gambar IV.13. Grafik Kuat Tarik Spesimen 2



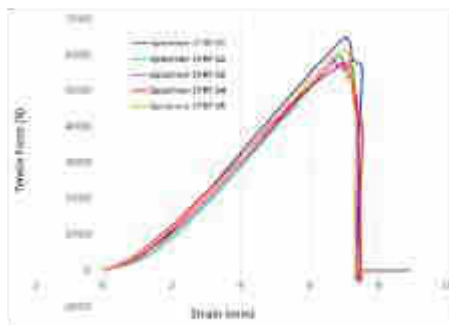
Gambar IV.14. Grafik Kuat Tarik Spesimen 3



Gambar IV.15. Grafik Kuat Tarik Spesimen 4



Gambar IV.16. Grafik Kuat Tarik Specimen 5



Gambar IV.17. Grafik Kuat Tarik Specimen 5 dan 1

Kuat Tarik Spesimen CFRP dari hasil uji Tarik dilaboratorium rata-rata sebesar $f_s = 3295,36 \text{ N/mm}^2$, maka kenaikan dari standard sesuai brosur cukup signifikan yang nilainya sebesar $f_s = 2800 \text{ N/mm}^2$. Dengan demikian dapat ditarik kesimpulan bahwa CFRP yang digunakan dilapangan sangat kuat karena mempunyai kapasitas diatas dari hasil analisa yang telah dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

1. ACI 201.1R, 1992, *“Guide for Making a Condition Survey of Concrete in Service”*
2. ACI 364.1R, 1993, *“Guide for Evaluation of Concrete Structures Prior to Rehabilitation”*
3. ACI 440, 2000, *“Guide For Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems For Strengthening Concrete Structures”*, January 2000.
4. American Concrete Institut(ACI 318M-11) , 2011 *“Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary”* First Printing September 2011.
5. Astawa M D.,et al, 2015, *“Repair and Strengthning with CFRP on Concrete Slab Structure of Structural Crack due to Shortage Reinforcement Footstool” Presiding Seminar International Bisstech, Kuta-Bali, 15-17 Oktober 2015.*
6. Astawa M D., dkk, 2015, *“Uji Kuat Tarik Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) sebagai alternative Pengganti Tulangan Lentur pada Struktur Beton” Presiding The Research Month LPPM-UPN “Veteran” Jawa Timur, Surabaya, 08 Desember 2015*

7. Astawa M D., 2008 "***Struktur Beton I***", Modul Ajar, Jurusan Teknik Sipil-FTSP, UPN "Veteran" Jawa Timur, ISBN : 978-979-1005-21-0.
8. Astawa M D., et al, 2016, "***Comparison of Bending Strength Concrete Floor Plate CFRP Reinforcing With Wire mesh Reinforcing an Alternative the Best Choice for Concrete Reinforcing Floor Plates***" Presiding International Conference The Research Month LPPM-UPN "Veteran" Jawa Timur, Surabaya, 12November 2016.
9. FIP, 1986, "***Inspection and Maintenance of Reinforced and Prestressed Concrete Structures***", London, 1986.
10. FIP, 1991 "***Repair and Strengthening of Concrete Structures***", London, 1991.
11. Hartono (2008), "***Perbaikan dan Perkuatan Struktur Beton***", makalah Seminar Teknik Sipil UPN "Veteran" Jawa Timur, tahun 2008.
12. Fizailly, Dian, 2004, "***Kapasitas Lentur Plat Lantai Beton Styrofoam ringan dengan Tulangan anyaman Kawat Baja (wiremesh)***", UGM Yogyakarta.
13. Hendra Putra, 2012, "***Tabel Perhitungan Kebutuhan Tulangan Plat Lantai Beton Bertulang dengan SNI 03-2847-2002, PBI 1971 dan Pemodelan SAP 2000 versi 14***", ITS Surabaya.
14. Mohsen Shahawy dkk (2001), "***Flexural Strengthening with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites of Preloaded Full-Scale Girders***" ACI Structural Journal/ September-Oktober 2001
15. Meier U., Erki M.A., "***Advantages of Composite Materials in the Post Strengthening Technique For Developing Countries, Sixth International Colloquium on Concrete in Developing Countries***", Pakistan, January 1997.
16. Reference of Sika's, "***Strengthening and Repair Projects***" seluruh proyek, 2000-2013.
17. SNI-2847-2013, "***Tata cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung***", Badan Standardisasi Nasional (BSN), Jakarta.
18. Sumber Makmur, 2015 "Standard dimensi Besi Beton Anyaman Wirwmes", Jl. Mangga Besar I No. 78 CDE, Jakarta Barat 11180.
19. The Concrete Society, 2000, "***Design Guidance For Strengthening Concrete Structures Using Fibre Composite Materials***", Technical Report No. 55, London, tahun 2000.
20. Technical Data of Sika's Product, dari tahun 2000 – 2014.